УДК 621.048.6.06

**В.Г. ЛЕБЕДЕНКО**

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ И ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ДРОБЬЮ

*Разработана система теоретических моделей формирования параметров качества поверхностного слоя деталей при дробеструйной обработке, прошедшая экспериментальную проверку. Данные модели могут быть использованы для повышения эффективности упрочняющей обработки дробью на стадии технологического проектирования.*
***Ключевые слова:*** *дробеструйная обработка, установившаяся шероховатость, максимальная глубина внедрения, глубина упрочненного слоя, степень упрочнения.*

**Введение.** Обработка дробью (ОД) относится к методам отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием (ППР). Обработка дробью осуществляется ударами дроби по деформируемому материалу и используется для упрочнения деталей и инструментов сложной формы, а также для обработки деталей, имеющих малую жесткость, а также для очистки деталей от окалины, нагара, остатков формовочной смеси на отливках, очистки сварных швов, удаления заусенцев и т.п.

Эффект, достигаемый при ОД, обеспечивается за счет упрочнения поверхностного слоя, создания в поверхностном слое детали сжимающих остаточных напряжений, однородной текстуры металла и специфической микрогеометрии, свойственной всем методам обработки гибкой рабочей средой.

Процесс обработки дробью включает две группы методов:

- дробеударная обработка (ДО), объединяющая методы обработки ППД сухой дробью – дробеструйный, дробеметный, гравитационный, пневмодинамический наклеп, беспыльная ДО;
- гидродробеударная обработка (ГДО), включающая методы упрочнения дробью с применением СОЖ – пневмогидродробеструйный, гидродробеструйный, гидродробеметный наклеп, упрочнение микрошариками.

В настоящее время дробью обрабатывают клапанные пружины, рессоры автомобилей, шестерни коробок передач и заднего моста (конические и цилиндрические), пружины подвески, лонжероны, всевозможные валы, полуоси, штанги, шатуны, поршневые пальцы, звенья цепей, поршни, картеры, блоки цилиндров, гильзы, втулки, подшипники, режущий инструмент, штампы и др. Также обработка дробью находит широкое применение в авиастроении для повышения надежности различных элементов несущих конструкций, особенно работающих в условиях вибрации.

Обработка дробью по сравнению с другими видами поверхностного упрочнения имеет ряд технологических и экономических преимуществ.

Наиболее важными из них являются высокая производительность, низкие затраты на оборудование, удобство в эксплуатации, значительная эффективность процесса, возможность обработки деталей разнообразных форм и размеров, возможность автоматизации процесса обработки, возможность одновременной обработки заготовок большими партиями, обеспечение стабильного качества поверхности. Необходимо также отметить возможность использования в качестве рабочей среды частиц различной формы и материалов в зависимости от вида обработки. Так, при упрочнении поверхностного слоя чаще всего используются стальные шарики подшипников качения и чугунная литая дробь, при очистке деталей – чугунная литая дробь, куски рубленой стальной проволоки и вишневая косточка, а в случае необходимости улучшения геометрических параметров поверхности – стальные шарики подшипников качения. Все вышесказанное обусловило широкое распространение этого метода упрочнения и очистки в промышленности.

**Постановка задачи.** Несмотря на широкое распространение методов обработки дробью, имеющиеся результаты, полученные рядом исследователей, недостаточно полно описывают процесс, носят эмпирический характер или рассматривают частные вопросы. Нет сведений по выбору технологических режимов применительно к процессу достижения заданных параметров поверхностного слоя (шероховатость поверхности, глубина упрочненного слоя, остаточные напряжения), практически не изучено влияние механических характеристик материала. Из выполненных исследований наибольший интерес в этой области представляют работы М.М.Саверина, В.В.Петросова, Б.П.Рыковского.

При исследовании основных технологических параметров обработки дробью одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия частиц рабочей среды с поверхностью обрабатываемой детали. Разработка теоретических зависимостей, описывающих форму и размеры следов обработки, позволит в дальнейшем перейти к теоретико-вероятностному описанию распределения следов на поверхности детали, что в свою очередь даёт возможность разработать модель формирования профиля шероховатости и физико-механических свойств поверхности детали.

**Содержание и результаты исследований.** Процесс единичного взаимодействия рассматривался во многих работах, так как он является основополагающим. Исследования показывают, что при гидродробеструйной обработке частицы рабочей среды соприкасаются с поверхностью детали под различными углами. Поэтому изначально для построения модели единичного взаимодействия, адекватно описывающей процесс обработки дробью, целесообразно рассмотреть случай косого соударения. В большинстве случаев при гидродробеструйной обработке деталей используются стальные шары, поэтому для упрощения схемы взаимодействия примем, что рабочей частицей является гладкая жесткая сфера. Примем также, что диаметры всех шаров одинаковы. Кроме того, не будем учитывать трение шарика при скольжении по поверхности при внедрении, возможное перекатывание исключим.

Взаимодействие жёсткого шарика с деформируемым полупространством описывается системой уравнений:

$$
\begin{cases} m = \dfrac{d^2h}{dt^2} \quad P_N; \\ m = \dfrac{d^2x}{dt^2} \quad P_\tau , \end{cases} \qquad (1)
$$

где $m$ – масса шарика, $m = \frac{4}{3} \pi \; R^3 \; \rho_ш$; $\rho_ш$ – плотность материала шарика; $t$ – время; $P_N$ – нормальная составляющая силы взаимодействия; $P_\tau$ – касательная составляющая силы взаимодействия.

Решение первого уравнения системы (1) можно найти, используя известное соотношение из теории пластического контакта гладкого сферического индентора с деформируемым полупространством [5]:

$$P_N = \pi R_{сф} h c \sigma_s ,$$

где $R_{сф}$ – радиус сферического индентора; $h$ – глубина внедрения сферического индентора; $c$ – коэффициент несущей способности контактной поверхности, учитывающий упрочнение материала детали при внедрении индентора; $\sigma_s$ - предел текучести материала детали.

Используя методику, приведенную в работе [2], и с учетом фактической площади контакта шарика с поверхностью детали преобразованное уравнение для глубины внедрения можно представить в виде:

$$\frac{d^2h}{dt^2} = - \frac{\pi \; R \; h \; k_s \; c \; \sigma_s}{m}, \qquad (2)$$

где $R$ – радиус шарика; $k_s$ - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта.

Подставив выражение массы $m$ через плотность и радиус шара, получим:

$$\frac{d^2h}{dt^2} = - \frac{3}{4} \frac{k_s \; c \; \sigma_s \; h}{\rho_ш \; R^2} .$$

Откуда, учитывая, что при $t = 0$, $h = 0$ и $\frac{dh}{dt} = \upsilon_0 \; \sin\alpha$ , получим:

$$\frac{dh}{dt} = \pm \sqrt{\upsilon_0 \; \sin\alpha \; - \frac{3}{4} \; \frac{k_s \; c \; \sigma_s}{\rho_ш \; R^2} \; h^2} . \qquad (3)$$

Из гидродинамики известно, что скорость полета шарика в струе жидкости можно определить по зависимости:

$$\upsilon_0 = 4 K_T \sqrt{P_{дин}} , \qquad (4)$$

где $P_{дин}$ – динамическое давление технологической жидкости или воздуха на выходе из сопла; $K_T$ – коэффициент потерь, учитывающий расстояние до обрабатываемой детали и плотность потока шариков; $K_T$ определяется экспериментально.

Таким образом, интегрируя уравнение (3) при $h = h_{max}$, $\frac{dh}{dt} = 0$ и учитывая зависимость (4), получим максимальную глубину внедрения шарика:

$$h_{\max} = 8 \; K_T \; R \; \sin\alpha \; \sqrt{\frac{P_{дин} \; \rho_ш \; k_ш}{3 \; k_s \; c \; \sigma_s}}\,, \tag{5}$$

где $\alpha$ – угол соударения шарика с поверхностью детали.

Пластическое деформирование поверхности детали при отделочно-упрочняющей обработке дробью происходит при многократном взаимодействии с ней стальных полированных шариков.

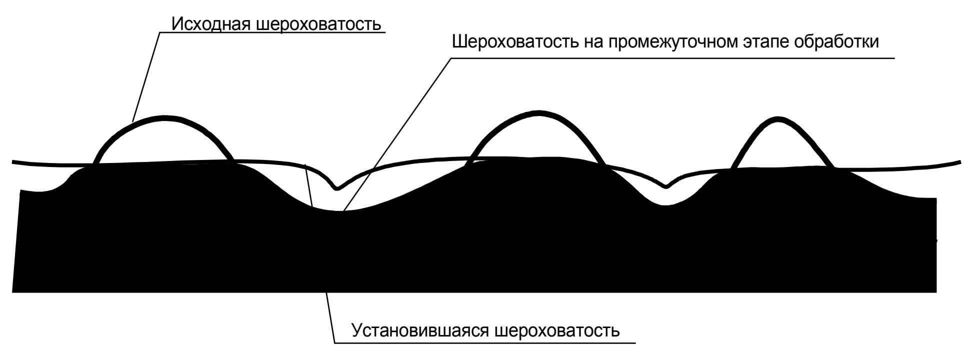



Рис.1. Образование профиля установившейся шероховатости

В начальный момент времени образуются единичные лунки с поперечной шероховатостью, зависящие от параметров исходного профиля. В дальнейшем, вследствие наложения и пересечения единичных следов (лунок), появляется новый определенный микрорельеф поверхности, характеризующийся однородностью свойств по всем направлениям. При продолжении процесса обработки он постоянно воспроизводится, а его параметры не будут изменяться в некоторый промежуток времени (вплоть до наступления перенаклёпа поверхности). Образованный таким образом микрорельеф, который определяется только технологическими режимами, размерами шариков и физико-механическими свойствами материала детали предложено считать *установившейся шероховатостью* [4]. Дальнейшего улучшения шероховатости поверхности можно достичь изменением динамического давления $P_{дин}$, расстояния до поверхности детали или заменой рабочей среды.

Известно, что пятно контакта шарика будет представлять собой близкий к окружности эллипс либо окружность с радиусом $r$. Величину радиуса $r$ можно определить из геометрической схемы внедрения шарика в поверхность детали:

$$r = \sqrt{R^2 - \left(R - h_{\max}\right)^2}\,. \tag{6}$$

Определив параметры единичного взаимодействия и используя теоретико-вероятностную схему формирования профиля шероховатости обработанной поверхности, предложенную профессором А.В. Королевым, можно получить значение среднего арифметического отклонения установившейся шероховатости

$$Ra_{уст} = 0.009\ \frac{r}{R}\sqrt{h_{\max}\ \ l_{ед}}\ , \qquad (7)$$

где $l_{ед}$ - единица длины нормального сечения детали; $l_{ед}$ введена при выводе зависимости (7) в соответствии с методикой, предложенной А.В.Королевым; для расчетов $l_{ед}$ принимается 1 м.

При решении технологических задач отделочно-упрочняющей обработки важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочненного слоя и степени упрочнения. От глубины упрочненного слоя $h_н$ зависят многие эксплуатационные свойства деталей, например, усталостная прочность. Величина $h_н$ определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и высокая плотность дислокаций кристаллической решетки, образованные в результате приложения внешней нагрузки. Под степенью упрочнения $\varepsilon$ понимается отношение радиуса лунки (отпечатка), образованного в результате внедрения индентора к радиусу этого индентора [3]. Степень упрочнения характеризует приращение микротвердости поверхностного слоя детали в результате ударного воздействия. Аналитическое определение глубины упрочненного слоя и степени упрочнения в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. Существующие математические зависимости, выведенные несколькими авторами, были получены на основе теории упругости или пластичности после принятия многочисленных упрощений и допущений.

Значительные исследования в этой области проведены И.В. Кудрявцевым, В.П. Пшибыльским, Е.Г. Коноваловым, Д.Д. Папшевым, М.М. Савериным и др.

В работе Кудрявцева И.В. [3] приведены зависимости для определения глубины наклепанного слоя и степени упрочнения в зависимости от характеристик следа единичного взаимодействия:

$$h_н = 3kr\ ,\ \ \varepsilon = \frac{r}{R}, \qquad (8)$$

где $k$ - коэффициент, зависящий от степени наклепа [3].

После некоторых преобразований выражений (8), учитывая зависимость (5), глубину упрочненного слоя и степень упрочнения при ОД можно определить по формулам:

$$h_н = 3k\sqrt{h_{\max}(2R - h_{\max})}\ ; \qquad (9)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{h_{\max}}{R}\ \ (2 - \frac{h_{\max}}{R})}\ . \qquad (10)$$

Для анализа влияния размеров обрабатывающей среды, режимов обработки и механических свойств обрабатываемого материала на величину среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости *Ra*, глубину упрочненного слоя $h_н$ и степень упрочнения $\varepsilon$ по зависимостям (7), (9) и (10) были произведены расчеты, результаты которых представлены на рис. 2-7.

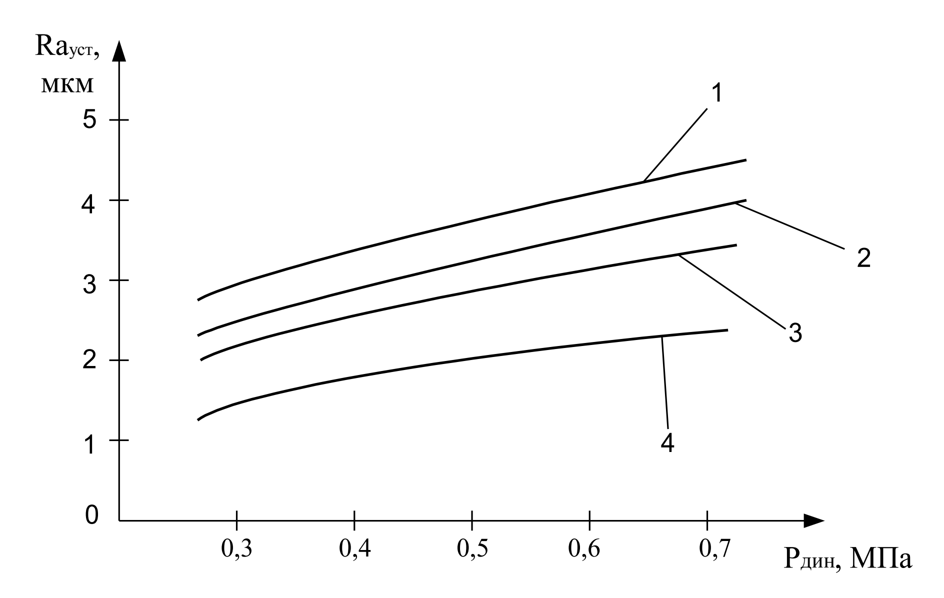



Рис.2. Теоретическая зависимость среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$ при дробеструйной обработке различных материалов от давления технологической жидкости (воздуха) на выходе из сопла $P_{дин}$: 1 – алюминиевый сплав Д16, $\sigma_s$ = 260 МПа; 2 – сталь 45, $\sigma_s$=350 МПа; 3 – алюминиевый сплав В95, $\sigma_s$=450 МПа; 4 – сталь 40ХН2МА-Ш, $\sigma_s$ = 930 МПа

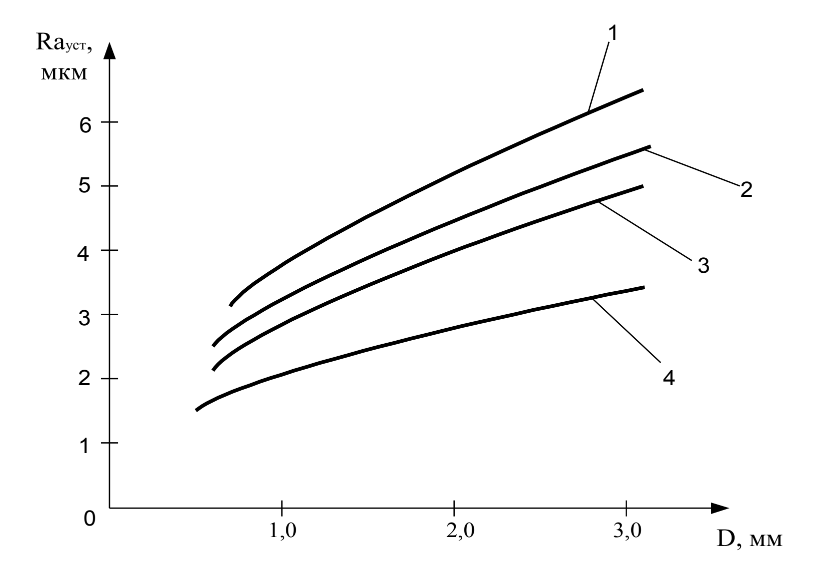



Рис.3. Теоретическая зависимость среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$ при дробеструйной обработке различных материалов от диаметра шариков $D$: 1 – алюминиевый сплав Д16, $\sigma_s$ = 260 МПа; 2 – сталь 45, $\sigma_s$ = 350 МПа; 3 – алюминиевый сплав В95, $\sigma_s$=450 МПа; 4 – сталь 40ХН2МА-Ш, $\sigma_s$ = 930 МПа

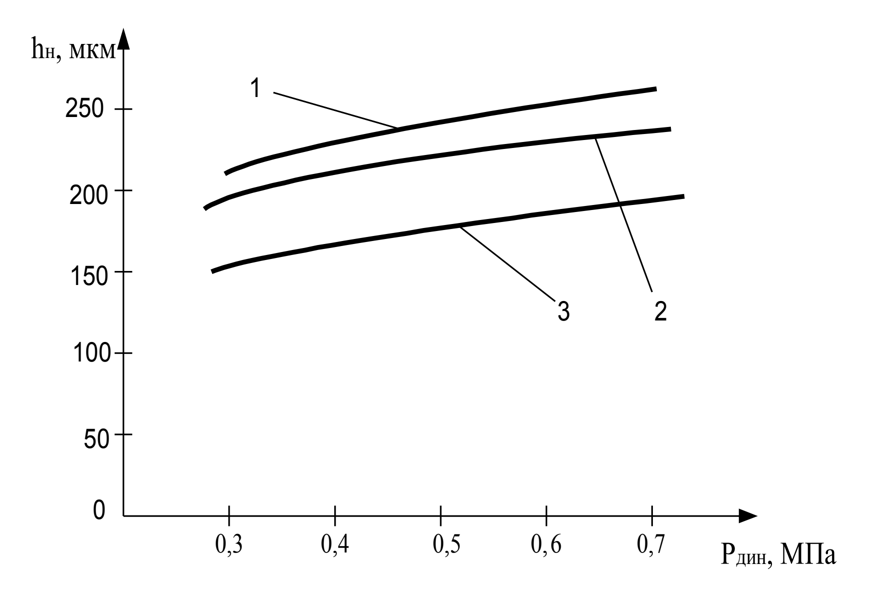



Рис.4. Теоретическая зависимость глубины упрочненного слоя $h_н$ при дробеструйной обработке различных материалов от давления технологической жидкости (воздуха) на выходе из сопла $P_{дин}$: 1 – алюминиевый сплав Д16, $\sigma_s$=260 МПа; 2 – сталь 45, $\sigma_s$=350 МПа; 3 – сталь 40ХН2МА-Ш, $\sigma_s$ = 930 МПа

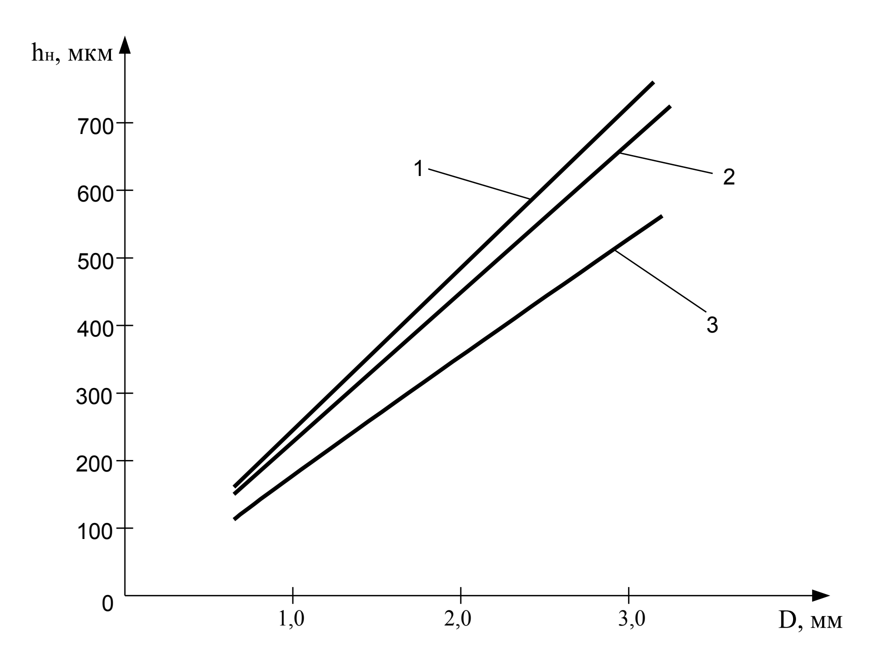



Рис.5. Теоретическая зависимость глубины упрочненного слоя $h_н$ при дробеструйной обработке различных материалов от диаметра шариков *D:* 1 – алюминиевый сплав Д16, $\sigma_s$ = 260 МПа; 2 – сталь 45, $\sigma_s$ = 350 МПа; 3 – сталь 40ХН2МА-Ш, $\sigma_s$ = 930 МПа

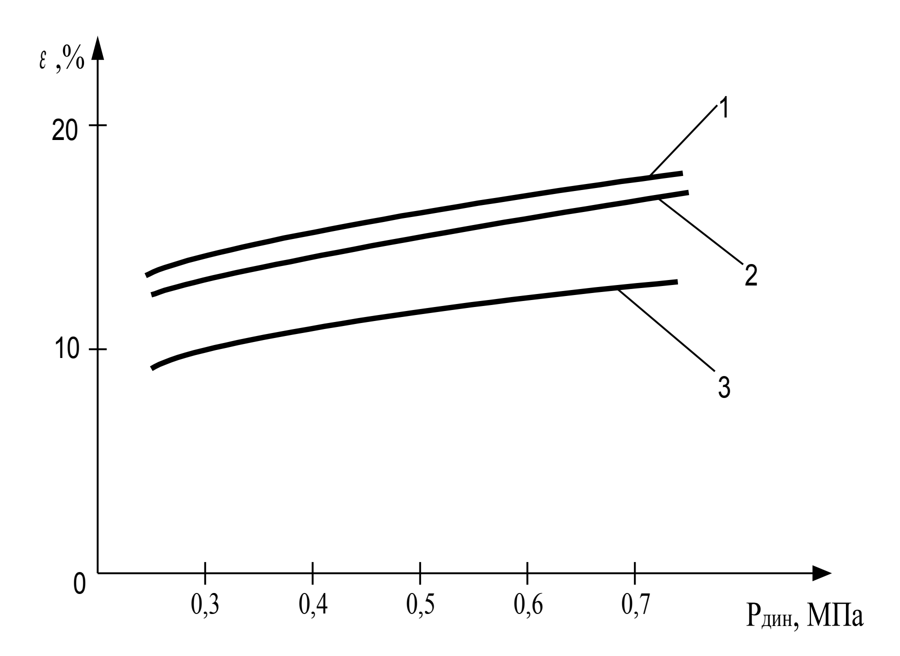



Рис.6. Теоретическая зависимость значения степени упрочнения ε при дробеструйной обработке различных материалов от давления технологической жидкости (воздуха) на выходе из сопла $P_{дин}$: 1 – алюминиевый сплав Д16, $\sigma_s$=260 МПа; 2 – сталь 45, $\sigma_s$=350 МПа; 3 – сталь 40ХН2МА-Ш, $\sigma_s$ = 930 МПа

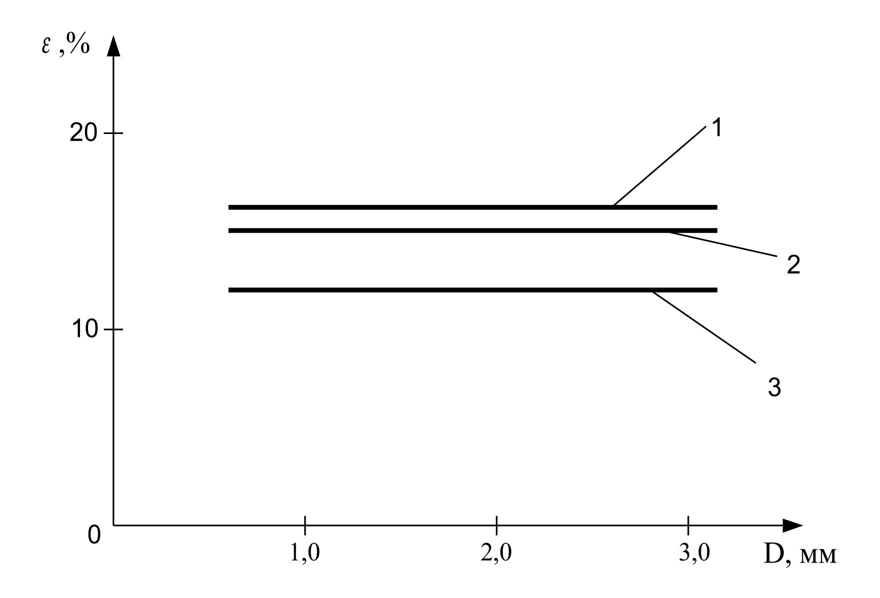



Рис.7. Теоретическая зависимость значения степени упрочнения ε при дробеструйной обработке различных материалов от диаметра шариков *D:* 1 – алюминиевый сплав Д16, $\sigma_s$ = 260 МПа; 2 – сталь 45, $\sigma_s$ = 350 МПа; 3 – сталь 40ХН2МА-Ш, $\sigma_s$ = 930 МПа

Для сравнения теоретических и экспериментальных исследований зависимости среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$, глубины упрочненного слоя $h_н$ и степени упрочнения $\varepsilon$ от давления технологической жидкости (воздуха) на выходе из сопла $P_{дин}$ при дробеструйной обработке специально подготовленных образцов из стали 40ХН2МА-Ш были проведены экспериментальные исследования процесса в условиях ОАО «Роствертол» на гидродробеструйной установке ГНЛ-15. При обработке использовались стальные полированные шарики диаметром 1 мм, давление технологической жидкости на выходе из сопла $P_{дин}$ менялось от 0,3 МПа до 0,6 МПа.

Результаты экспериментальных исследований в сравнении с теоретическими приведены на рис. 8-10.

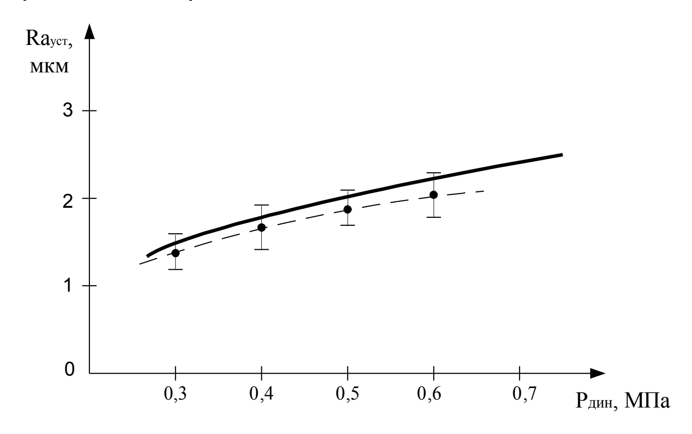



Рис.8. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований зависимости среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$ при дробеструйной обработке стали 40ХН2МА-Ш от давления технологической жидкости (воздуха) на выходе из сопла $P_{дин}$:

——— теоретическая зависимость;
— — — экспериментальная зависимость

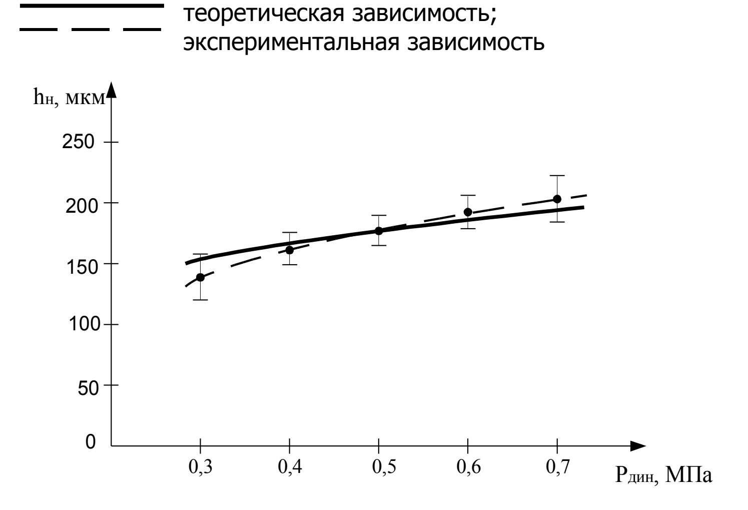



Рис.9. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований зависимости глубины упрочненного слоя $h_н$ при дробеструйной обработке стали 40ХН2МА-Ш от давления технологической жидкости (воздуха) на выходе из сопла $P_{дин}$:

——— теоретическая зависимость;
— — — экспериментальная зависимость

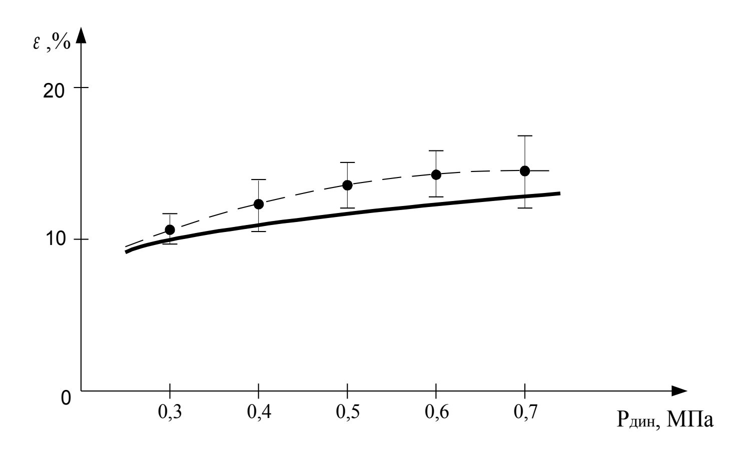



Рис.10. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований зависимости степени упрочнения ε при дробеструйной обработке стали 40ХН2МА-Ш от давления технологической жидкости (воздуха) на выходе из сопла $P_{дин}$:

——————— теоретическая зависимость;

— — — экспериментальная зависимость

Анализируя результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований, можно заключить следующее:

1. Применение обрабатывающей среды (шариков, дроби) меньшего размера, а также уменьшение давления пульпы позволяет получить более гладкую шероховатость поверхности.
2. При обработке материалов с меньшим пределом текучести $\sigma_s$ образуется более грубая шероховатость.
3. Глубина упрочненного слоя увеличивается при обработке более мягкого материала, при увеличении динамического давления пульпы (увеличении скорости движения частиц обрабатывающей среды), а также при увеличении размеров частиц обрабатывающей среды.
4. Степень упрочнения при дробеструйной обработке увеличивается при увеличении энергии воздействия частиц обрабатывающей среды ($P_{дин}$), а также при обработке более мягких материалов.
5. Размер частиц обрабатывающей среды никак не влияет на степень упрочнения при дробеструйной обработке.
6. Полученные результаты имеют физический смысл и не противоречат установившимся представлениям о процессе дробеструйной обработки.
7. При сравнении результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов установлено, что расхождение между ними не превышает 20%.

**Выводы.** Разработаны и экспериментально подтверждены комплексная система теоретических моделей обработки дробью и методика расчета размеров следов единичного взаимодействия, позволяющая прогнозировать шероховатость поверхности, глубину упрочненного слоя и степень упрочнения с учетом влияния режимов обработки, характеристик рабочих сред и

свойств материала детали при дробеструйной обработке. Полученные зависимости могут быть использованы для повышения эффективности упрочняющей обработки дробью на стадии технологического проектирования.

**Библиографический список**


1. Рыковский Б.П. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом /Б.П.Рыковский и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
2. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С.190-200.
3. Кудрявцев И.В. Повышение прочности и долговечности крупных тяжелых деталей машин поверхностным наклепом /И.В.Кудрявцев и др. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970. – 144 с.
4. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис… докт. техн. наук /М.А.Тамаркин. – Ростов н/Д, 1995.
5. Михин Н.М. Внешнее трение твёрдых тел /Н.М.Михин. – М.: Наука, 1977. – 222 с.


Материал поступил в редакцию 10.11.08.

**V.G.LEBEDENKO**

## THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF PROCESS OF FORMATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF THE SUPERFICIAL LAYER AND HARDENING AT PROCESSING DETAILS IN FRACTION.

*The system of theoretical models past experimental check is developed. The given models can be used for increase of efficiency of strengthening processing in fraction at a stage of technological designing.*

**ЛЕБЕДЕНКО Вячеслав Георгиевич** (р.1975), ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета. Окончил ДГТУ (1998) по специальности «Технология машиностроения». Занимается исследованием процесса обработки дробью с учетом обеспечения безопасных условий труда оператора.
Опубликовано более 20 научных статей.